

방파제의 마루높이 산정을 위한 평균 월파량과 전달파고 Mean Overtopping Discharges and Transmitted Wave Heights for Evaluation of Crest Freeboards of Breakwaters

이철응*
Cheol-Eung Lee*

요지 : 전달파고와 허용 월파량을 함께 고려하여 방파제의 마루높이를 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 방파제를 형식별로 구분하여 현재 가장 일반적으로 사용되는 경험식들을 활용하여 입사파고와 평균 월파량 그리고 전달파고의 관계를 정량적으로 해석하였다. 기존의 연구 결과와 비교하여 만족스럽게 검증되었으며, 임의의 입사파랑에 대하여도 적용할 수 있는 무차원 평균 월파량과 전달계수의 관계도 방파제 형식별로 제시, 비교하였다. 또한 주기 및 파고 변화에 따른 평균 월파량과 전달파고의 관계를 수립하여 허용 월파량을 산정할 수 있었다. 마지막으로 허용 월파량에 따른 상대 마루높이 결정방법을 경사제와 무공 케이슨식 혼성제에 적용하였다. 경사제와 혼성제 모두에서 허용 월파량이 커지면 상대 마루높이는 급격하게 작아지는 경향을 보였다. 특히 상대적으로 작은 범위에서는 허용 월파량이 동일해도 혼성제의 마루높이가 경사제의 마루높이보다 커야 하지만, 일정 수준 이상의 큰 허용 월파량에 대해서는 그 반대의 경향을 보였다. 혼성제의 경우는 월파량이 작아도 항내로 직접 낙하하여 상대적으로 큰 항내 전달파고를 유발하지만, 월파량이 일정 수준을 넘어서면 방파제의 형식에 따른 영향이 작아지면서 체체를 통한 투과파의 영향이 경사제에 고려되기 때문이다.

핵심용어 : 허용월파량, 전달파고, 경사제, 혼성제, 마루높이

Abstract : A method that can take into account the transmitted wave heights and the allowable overtopping discharges together has been presented in order to determine the crest freeboards of breakwaters. Thus, the relationships of the incident waves, mean overtopping discharges and the transmitted wave heights have been quantitatively analyzed by various empirical equations which have separately been used according to the types of breakwaters up to recently. The present results have been satisfactorily calibrated through the comparison with the previous results of EurOtop (2018) for the same condition. The relationships of dimensionless mean overtopping discharges and wave transmission coefficients for any incident waves have also been presented and compared them with the types of breakwaters. In addition, the allowable overtopping discharges can be evaluated from the combinations of the transmitted wave heights and the mean overtopping discharges with respect to the various periods and heights of incident waves. Finally, the method for determining the relative crest freeboards of breakwaters with the allowable overtopping discharges has been applied to both the rubble-mound breakwaters and the composite breakwaters. It has been found that the relative crest freeboards of breakwaters tend to be decreased sharply as the allowable overtopping discharges are increasing. In particular, the relative crest freeboards of composite breakwaters should be larger than those of the rubble-mound breakwaters under the condition of the same overtopping discharges in the small ranges, whereas the opposite trends can be shown for the allowable overtopping discharges in the large range over some amounts of level. This may be due to the effects of that the relatively larger transmitted wave heights can be induced by the direct impacts of the overtopping discharges to the harbors inside the composite breakwaters, while, in the rubble-mound breakwaters, the overtopping discharges are mildly transferred along the inside slopes of breakwaters. However, these effects seem to be neglected when the overtopping discharges become very large, the penetration effects may even be considered in the rubble-mound breakwaters instead.

Keywords : allowable overtopping discharges, transmitted wave heights, rubble-mound breakwaters, composite breakwaters, crest freeboards

*강원대학교 건축·토목·환경공학부 교수(Professor, Department of Architectural, Civil, and Environmental Engineering, Kangwon National University, 1 Gangwondaehakgil, Chuncheon, Gangwon 24341, Korea, Tel: +82-33-250-6238, Fax: +82-33-256-6235, celee@kangwon.ac.kr)

1. 서 론

방파제 설치 목적은 외해에서 내습하는 파랑을 차단하여 항내 정온성을 유지하는 것이다. 따라서 선박의 접안이나 하역 등이 이루어지는 평상시 파랑에 대한 정온성은 물론 태풍 내습시에도 항내 파고가 일정 수준 이하로 유지되어야 한다. 항내 파고는 항 입구를 통한 회절파고와 방파제를 통과한 전달파고의 합으로 정의된다. 항 입구를 통해 항내로 유입되는 회절파고는 파랑변형 수치모형을 이용하여 계산할 수 있지만, 전달파고의 경우는 동일한 방법으로 산정할 수 없다. 이는 전달파가 방파제 상부를 통과하는 월파에 의하여 발생하기 때문이다. 일반적으로 월파에 의하여 방파제 배후면에 발생하는 전달파를 Cauchy-Poisson 파랑(Goda, 2010)이라고 한다. 전달파고는 실험에 의하여 제시된 전달계수 경험식으로부터 산정할 수 있으나, 전달파의 주기는 입사파랑의 주기보다 약 1/2배 작다고만 알려져 있다. 따라서 전달파의 주기를 정량적으로 산정하기 위해서는 전달계수의 함수로 표현되는 것이 더 바람직하다(Alberti et al., 2001). 한편 월파는 방파제의 마루높이보다 큰 처오름이 발생하여 방파제 상부를 통해 항내로 대규모 유량이 일시에 유입되는 현상으로 정의되고, 주로 평균 월파량의 개념으로 정량화된다. 최근 우리나라에 직접적인 영향을 미치는 태풍은 과거와 다르게 매년 2개에서 3개 이상 발생하고 있다. 그로 인해 항만 운용 등에 미치는 월파의 영향이 크게 자주 발생하고 있다. 따라서 국가에서 관리하는 주요 항만의 방파제 설계시 입사파랑과 평균 월파량에 의해 발생하는 항내 전달파고의 관계가 올바르게 고려되어야 한다. 현재까지 우리나라에서는 방파제의 마루높이를 결정할 때 월파량을 고려하지 않는다.

방파제의 월파와 관련하여 수행된 많은 연구들은 주로 평균 월파량 산정식을 제시하는 것이다. 마루높이에 따른 평균 월파량을 산정하여 허용 월파량과 비교하기 위함이다(Lee, 2003, 2009, 2011). 호안(dikes/seawalls)에 대해서는 평균 월파량 산정식 뿐만 아니라 허용 월파량에 대해서도 비교적 자세히 연구되었다(CEM, 2006; Rock manual, 2007; EurOtop, 2018). 그러나 방파제에 대해서는 허용 월파량에 대한 연구가 상대적으로 부족한 실정이다. 이는 방파제의 설치 목적상 평균 월파량을 항내 전달파고와 연결시켜야 하는 복잡한 해석 과정이 필요하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 방파제를 여러 형식으로 분류하여 입사파고와 평균 월파량, 그리고 전달파고의 관계까지 해석하였다. 우리나라 항만 설계 기준서(MOF, 2020)에 표준적인 단면 형태가 잘 제시된 경사제(rubble-mound breakwaters), 혼성제(composite breakwaters) 그리고 소파블록 피복제(horizontally-composite breakwaters)를 대상으로 평균 월파량과 전달파고의 관계를 해석하였다. 이는 전달파고를 기반으로 허용 월파량을 산정하여 방파제의 마루높이를 결정할 수 있는 방법을 제시하기 위함이다. 유럽에서는 방파제의 마루높이도 호안과 같이 허용 월파량의 개

념으로 산정하고 있기 때문에, 본 연구 결과를 이용하면 외국의 설계방법과 동일하게 월파량을 고려하면서 현재 우리나라에서 사용하고 있는 전달파고 개념도 함께 적용할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제 2절에서는 최근까지 제시된 많은 평균 월파량 산정식을 하나의 형식으로 통합하여 제시하고, 방파제 형식에 따른 적용 방법을 설명하였다. 제 3절에서는 방파제 형식에 따라 각기 다른 전달계수 산정식을 제시하고, 물리적 의미를 설명하였다. 한편 제 4절에서는 다양한 입사조건 및 마루높이에 따라 평균 월파량과 전달계수를 동시에 해석하여 방파제 형식별로 평균 월파량과 전달계수 및 전달파고의 관계를 정량적으로 해석하였다. 또한 허용 월파량을 이용하여 방파제의 마루높이를 결정할 수 있는 방법을 경사제와 혼성제에 적용하였다. 마지막으로 제 5절에 결론을 제시하였다.

2. 평균 월파량 산정식

방파제 형식별로 평균 월파량과 전달파고의 관계를 해석하기 위해서는 먼저 평균 월파량 산정식을 정의해야 한다. 평균 월파량 산정식도 많은 연구자들에 의하여 다양한 형식으로 제안되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 가장 최근까지 제시된 산정식들을 분석하여 다음 식(1)과 같이 통합된 하나의 형식으로 정리하였다.

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = a \exp \left[- \left(b \frac{R_c}{H_s \gamma_f \gamma_\beta} \right)^c \right] \quad (1)$$

여기서 H_s 는 입사 유의파고, R_c 는 방파제의 마루높이, γ_f 는 전면 피복층의 마찰계수(roughness factor), γ_β 는 입사각 계수, a , b , 그리고 c 는 경험계수다. 식(1)은 복잡한 월파 현상을 평균 월파량의 개념으로 정량화하기 위해 제시된 식인데, 수학적으로는 상대 마루높이와 입사파고만의 함수로 단순화시킨 것이다. 따라서 양함수적으로 포함되지 않은 주기 등 여타 변수들의 영향은 실험자료를 기반으로 경험계수에 포함되었다.

지금까지 연구된 모든 평균 월파량 산정식들이 CEM(2006), Rock Manual(2007), 그리고 EurOtop(2007, 2018)에 자세히 제시되어 있다. 본 연구에서는 이들을 비교 분석하여, 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 평균 월파량 산정식의 경험계수를 먼저 방파제의 형식별로 정리하여 Table 1에 제시하였다. 표에서 볼 수 있듯이 동일 형식의 방파제에서도 경험계수가 약간 다르게 제시되고 있는데, 이는 경험계수 결정과정에 새로 포함된 자료에 따른 영향이다. 각 계수에 따른 영향이 EurOtop(2018)에서 자세히 비교 분석되었다. 또한 마찰계수, γ_f 와 입사각 계수, γ_β 도 방파제 형식에 따라 다르게 정의된다. 먼저 경사제와 소파블록 피복제의 경우 전면이 불투수층인 경우는 $\gamma_f = 1.0$, 코어층이 투수성이면서 2층 사석재로 피복된 경우는 0.4, TTP로 피복된 경우는 0.38이다. 그러나 혼성제에서는 전면이 무공인 경우가 1.0, 유공인 경우는 상부의 형

Table 1. Values of empirical factors, a , b , and c in Eq. (1) with respect to various types of breakwaters

Type of Breakwaters	a	b	c	Reference
Rubble-mound breakwaters	0.09	1.5	1.3	EurOtop (2018)
and				
Horizontally-composite breakwaters	0.2	2.3	1.0	EurOtop (2007) Rock Manual (2007)
Plain	0.047	2.35	1.3	EurOtop (2018)
Composite breakwaters	0.04	2.6	1.0	EurOtop (2007)
	0.082	3.0	1.0	CEM (2006)

상에 따라 0.58~0.79까지 구분하여 정의된다. 한편 직각으로 입사하는 경우는 방파제의 형식에 상관없이 입사각 계수, $\gamma_\beta = 1.0$ 이지만, 그 외의 경우는 경사식 방파제와 혼성제에서 각기 다른 식으로 정의된다(CEM, 2006; EurOtop, 2018).

따라서 식(1)을 사용하여 마루높이에 따른 평균 월파량을 산정할 때 방파제 형식에 따른 경험계수들은 Table 1에 주어진 자료를 활용하면 된다. 그러나 마찰계수와 입사각 계수 설정 시 주의해야 한다. 경사제의 경우는 전면 피복층의 조건에 따라, 혼성제의 경우는 유공 케이스와 상치 형태에 따라 달라진다. 본 연구에서는 물리적으로 타당하고 가장 최근에 수정 제시된 EurOtop(2018)의 경험계수를 이용하여 해석하였지만, 비교 목적으로 과거에 제시된 자료도 함께 사용하였다.

3. 전달계수 산정식

앞에서 제시된 평균 월파량 산정식을 보면 방파제의 형식 및 입사파량과 직접적으로 만나는 전면 조건에 따라 각각의 계수들이 다르게 정의되고 있다. 그러나 평균 월파량 산정식들은 방파제의 형식에 상관없이 모두 상대 마루높이(relative crest freeboard), R_c/H_s 의 함수로 표현되고 있다. 따라서 평균 월파량을 전달과고와 연결시키기 위해서는 전달과고를 상대 마루높이로 표현해야 한다. 전달과고에 대한 많은 실험적 연구들이 Seelig(1980), Powell and Allsop(1985), Ahrens(1987), Tanimoto, et al.(1987), van der Meer(1988), Daemen(1991), Goda(2000, 2010), CEM(2006), Rock Manual(2007), EurOtop (2007, 2018) 등에 의하여 수행되었다. 이들은 공통적으로 파랑 에너지 개념으로 입사파고에 대한 전달과고의 비로 정의되는 전달계수(wave transmission coefficient), $K_T = H_s^T/H_s$ 를 상대 마루높이 뿐만 아니라 입사파랑 특성 등의 함수로 제시하였다. 본 연구에서는 이들 연구를 기반으로 방파제 형식 별로 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 전달계수 산정식들을 사용하였다.

먼저 경사제(rubble-mound breakwaters)에 대한 전달계수 산정식을 제시하였다. 본 연구에서는 많은 실험 및 관측자료를 기반으로 EurOtop(2007, 2018)에서 제시하고 있는 다음

식(2)를 사용하였다. 식(2)는 경사제 상부를 통한 월파 뿐만 아니라 제체를 통과한 투과파의 영향도 함께 고려된 식이다.

$$K_T = -0.4 \frac{R_c}{H_s} + 0.64 \left(\frac{B}{H_s} \right)^{-0.31} (1 - e^{-0.5\xi_{op}}), 0.075 \leq K_T \leq 0.8 \quad (2)$$

여기서 B 는 천단폭, $\xi_{op} = \tan \alpha / \sqrt{s_{op}}$ 는 쇄파계수, α 는 제체 경사, $s_{op} = H_s/L_{op}$ 는 파형경사, $L_{op} = gT_p^2/2\pi$ 로 스펙트럼의 첨두주기(peak wave period)에 대한 심해파장이다. 식(2)는 상대 마루높이 뿐만 아니라 상대 천단폭(B/H_s), 그리고 파형경사의 함수로 제시되었다. 따라서 동일한 제체 제원, 상대 마루높이와 천단폭, 제체 경사에서 쇄파계수 ξ_{op} 가 커지면, 즉 파형경사 s_{op} 가 작아지면 전달계수는 증가하게 된다. 이는 장주기 파랑에 의하여 상대적으로 더 큰 전달과고가 발생한다는 의미이다. 그러나 Rock Manual(2007)에서는 이와 같은 효과를 무시하고 다음 식(3)과 같이 상대 마루높이만의 함수로 간편하게 정의되는 전달계수 산정식을 제시하기도 했다.

$$K_T = 0.46 - 0.3 \frac{R_c}{H_s}, -1.13 < \frac{R_c}{H_s} < 1.2 \quad (3)$$

한편 혼성제(composite breakwaters)에 대하여는 EurOtop(2007, 2018)에서 Goda(2000)에 제시된 다음 식(4)를 사용하고 있다. 경사제에 대한 식(2)와는 다르나 식(3)과 동일하게 상대 마루높이만의 함수로 간단하게 제시된 식이다. 혼성제의 경우는 경사제와 다르게 직립 케이스 제체가 불투과성이기 때문에 제체를 직접 통과하는 투과파의 영향과 전면 경사에 따른 영향을 고려할 필요가 없기 때문이다.

$$K_T = 0.3 \left(1.5 - \frac{R_c}{H_s} \right), 0 < \frac{R_c}{H_s} < 1.25 \quad (4)$$

혼성제에 대한 전달계수 산정식으로 최근까지 식(4)가 가장 일반적으로 사용되고 있기는 하지만 Alberti et al.(2001)은 다음 식(5)를 제시하기도 하였다(Goda, 2010).

$$K_T = \exp \left[- \left(1.14 + 1.16 \frac{R_c}{H_s} \right) \right], \frac{R_c}{H_s} > -0.2 \quad (5)$$

마지막으로 Goda(2010)는 소파블록 피복제(horizontally-composite

breakwaters)에 대하여도 다음 식(6)과 같이 정의되는 전달계수 산정식을 상대 마루높이만의 함수로 제시하였다.

$$K_T = 0.3 \left(1.1 - \frac{R_c}{H_s} \right), \quad 0 \leq \frac{R_c}{H_s} \leq 0.75 \quad (6)$$

이상과 같이 방파제 형식에 따라 현재까지 제시된 평균 월파량에 의하여 발생하는 방파제 배후면 인근의 항내 전달과고를 산정할 수 있는 식들이 정의되었다. 혼성제와 소파블록 피복제에서는 전달계수가 상대 마루높이만의 함수로 비교적 간단하게 정의되는데 비해, 경사제에서는 파형경사와 제체 경사 그리고 상대 천단폭의 함수로 제시되었다. 따라서 본 연구에서는 이들 전달계수를 평균 월파량 산정식과 함께 해석하여 태풍시 평균 월파량에 따른 전달과고 거동 특성을 해석하였다. 이는 방파제의 마루높이 결정시 평균 월파량과 전달과고를 동시에 고려하기 위함이다.

4. 평균 월파량에 따른 전달과고 해석

방파제의 마루높이를 결정하기 위해서는 다음 식(7)과 같이 항 입구를 통해 들어오는 회절과고, H_s^D 와 월파에 의한 전달과고, H_s^T 의 합이 항내 허용과고, H_s^{allow} 보다 작아야 한다는 개념을 적용해야 한다.

$$H_s^{allow} \geq H_s^{basin} = H_s^D + H_s^T \quad (7)$$

일반적으로 식(7)의 개념은 평상시 조건과 태풍시 조건으로 구분되어 적용되지만, 평상시에는 태풍시에 비하여 월파가 상대적으로 매우 작게 발생되기 때문에 전달과고에 비하여 회절과고가 지배적이다. 전달과고의 영향은 무시할 수 있을 정도이고, 평상시 조건으로 마루높이를 결정하는 것이 상당히 어렵게 된다. 특히 전 절에서 제시된 방파제 형식별 전달계수들의 그 적용 범위를 보면 각각의 식들은 어느 정도 월파가 발생하는 경우에만 적용할 수 있다. 따라서 태풍시 발생하는 월파와 연결된 전달계수를 이용하여 방파제의 마루높이를 결정해야 한다.

한편 외국에서는 방파제의 마루높이를 결정할 때 다음 식(8)과 같이 평균 월파량, q 가 허용 월파량, q_a 보다 작아야 된다는 개념을 사용한다(Viet et al., 2008).

$$q_a \geq q \quad (8)$$

허용 월파량이 자세하게 제시된 호안의 경우는 식(8)만을 이용하여 마루높이를 결정할 수 있다. 그러나 방파제의 경우는 호안과 다르게 월파량이 항내 전달과고로 연결되기 때문에 식(8)만을 이용하여 마루높이를 결정할 수 없다. 따라서 방파제의 경우는 식(7)과 식(8)의 개념을 동시에 적용해서 마루높이에 따른 평균 월파량을 항내 전달과고와 연계해야 한다. 즉, 태풍시 평균 월파량에 따른 전달과고의 거동 특성을 해석해서 방파제의 마루높이를 결정해야 한다.

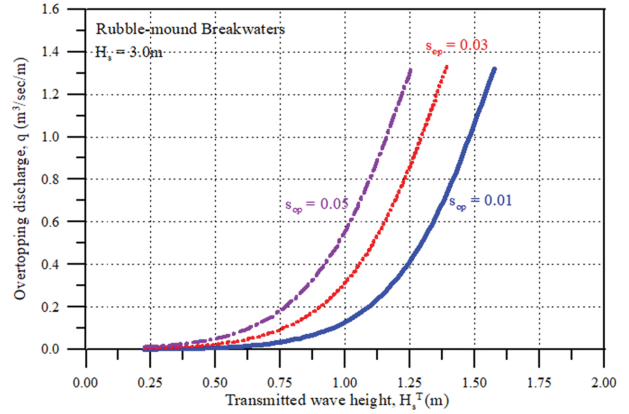


Fig. 1. Transmitted wave heights and overtopping discharges with different wave steepness, s_{op} for rubble-mound breakwaters.

먼저 $a=0.09$, $b=1.5$ 그리고 $c=1.3$ 의 식(1)과 식(2)를 이용하여 경사제에서 평균 월파량에 따른 전달과고의 거동 특성을 해석하였다. 상대 마루높이를 변화시키면서 식(1)과 식(2)를 이용하여 각각 산정된 평균 월파량과 전달과고를 결합하여 얻어진 결과를 Fig. 1에 제시하였다. 결과의 검증에 위하여 EurOtop(2018)에서 해석한 조건과 동일하게 입사과고, $H_s = 3.0$ m, 제체경사, $\cot\alpha = 1.5$, 상대 천단폭, $B/H_s = 1.5$ 이며, 전면이 사석제에 의해 2층으로 피복된 피복층에 입사파가 직각으로 입사한다고 가정하였다. 따라서 $\gamma_f = 0.4$, $\gamma_\beta = 1.0$ 이다. EurOtop(2018)에 제시된 결과와 비교하면, 평균 월파량이 같아도 파형경사가 작아지면 전달과고가 커지는 특성 뿐만 아니라 월파량이 거의 없을 때도 방파제 배후면 인근에서 어느 정도 전달과고가 발생하는 특성까지 만족스럽게 일치하고 있다. 또한 항내 전달과고 $H_s^T = 1.0$ m는 파형경사에 따라 평균 월파량이 약 $q = 0.1 \text{ m}^2/\text{sec}/\text{m} \sim q = 0.6 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}$ 의 상당히 큰 평균 월파량과 관련된다는 사실도 확인할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 개념을 확장하여, 임의의 입사파량에 대하여도 적용할 수 있도록 무차원 평균 월파량과 전달

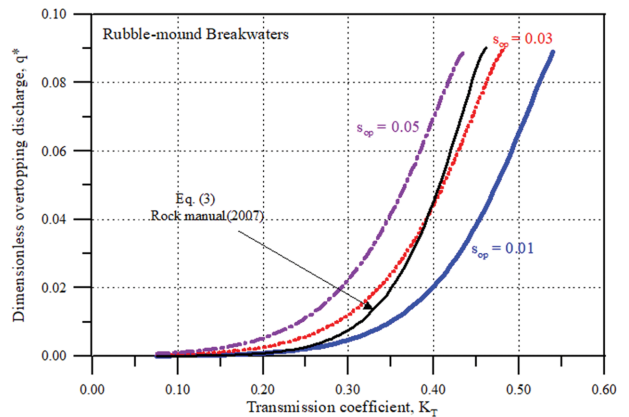


Fig. 2. Wave transmission coefficients and dimensionless overtopping discharges with different wave steepness, s_{op} for rubble-mound breakwaters.

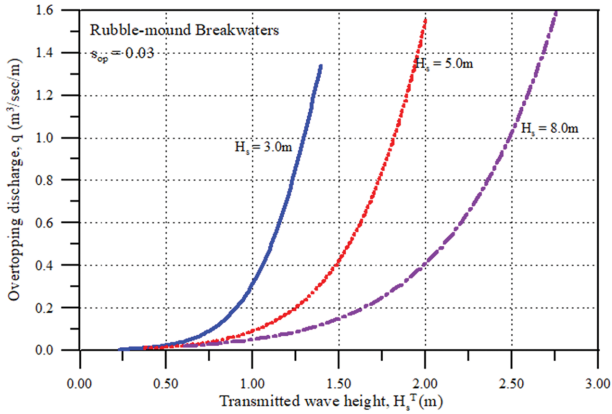


Fig. 3. Transmitted wave heights and overtopping discharges with various wave heights for rubble-mound breakwaters.

계수의 관계를 Fig. 2에 제시하였다. 그림에는 식(3)의 간편식을 이용하여 산정된 결과도 함께 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 동일한 월파량에 대하여 주기가 길수록 전달계수는 커진다. 또한 각각의 전달계수를 유발하는 무차원 평균 월파량의 범위가 쉽게 알 수 있다. 한편 식(3)으로 산정한 결과도 함께 비교하였는데, 그림에서 볼 수 있듯이 파형경사, $s_{op} = 0.03$ 의 결과에 가장 근접하나 특성은 다르게 거동한다. 월파량이 작은 경우에는 더 큰 전달계수를 산정하고, 반대로 월파량이 큰 경우에는 오히려 전달계수를 작게 산정하고 있다. 따라서 주기에 따른 영향을 고려할 수 없는 식(3)을 사용할 때는 이와 같은 거동특성에 주의해야 한다.

마지막으로 주기와 과고 변화에 따른 평균 월파량과 전달과고의 관계를 해석하였다. 파형경사, $s_{op} = 0.03$ 으로 일정한 때 입사과고 변화에 따른 해석 결과를 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3은 다음과 같이 태풍시 방파제의 마루높이 결정 과정에 유용하게 사용될 수 있다. 먼저 항내 허용과고 H_s^{allow} 와 항내 회절과고 H_s^D 를 알고 있을 때, 식(7)을 이용하면 항내 전달과고 H_s^T 의 상한치를 알 수 있다. 따라서 Fig. 3으로부터 항내 전달과고의 상한치에 해당하는 평균 월파량을 구할 수 있는데, 이와 같이 구해진 평균 월파량은 물리적으로 허용 월파량과 동일한 의미를 갖게 된다. 따라서 방파제의 마루높이는 식(1)과 식(8)을 결합하여 얻어지는 다음 식(9)를 이용하여 쉽게 결정할 수 있다.

$$\frac{R_c}{H_s} \geq \frac{\gamma \gamma_{\beta}}{b} \left[\ln \left(a \frac{\sqrt{g} H_s^3}{q_a} \right) \right]^{1/c} \quad (9)$$

경사제에서 식(9)를 이용하여 산정된 허용 월파량에 따른 최소 상대 마루높이를 Fig. 4에 제시하였다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 전반적으로 허용 월파량이 작아질수록 상대 마루높이는 급격하게 증가한다. 특히 허용 월파량이 호안 수준으로 상당히 낮은 구간에서는 그와 같은 경향이 더 강하게 나타나고 있다.

한편 본 연구에서는 무공 케이스 혼성제에 대한 태풍시 평

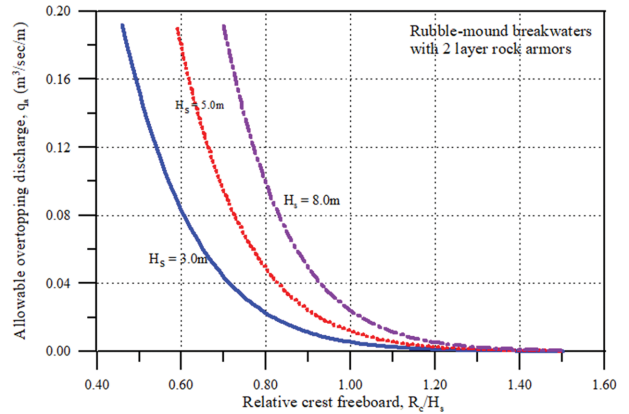


Fig. 4. Relative crest freeboards and allowable overtopping discharges with various wave heights for rubble-mound breakwaters.

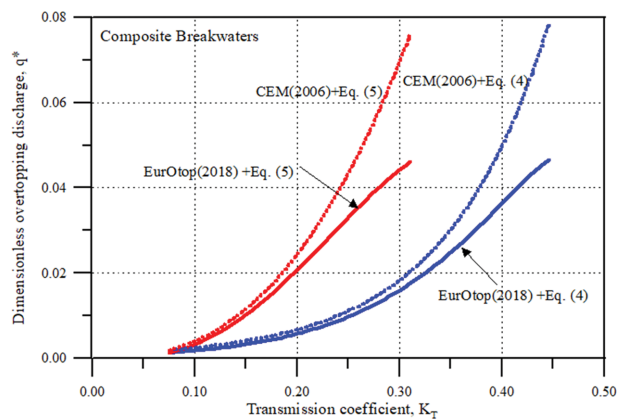


Fig. 5. Wave transmission coefficients and dimensionless overtopping discharges with different equations for plain composite breakwaters.

균 월파량과 전달계수의 관계도 해석하였다. 평균 월파량을 산정하기 위하여 $a = 0.047$, $b = 2.35$ 그리고 $c = 1.3$ 에 해당하는 EurOtop(2018)의 식(1)과 $a = 0.082$, $b = 3.0$ 그리고 $c = 1.0$ 를 갖는 CEM(2006)의 식(1)을 모두 이용하였다. 또한 전달계수는 식(4)와 식(5)를 모두 적용하였다. 따라서 조합된 4가지에 대한 해석 결과를 Fig. 5에 제시하였다.

전반적인 경향은 Fig. 2에 제시한 경사제에 대한 결과와 유사한 거동특성을 보이고 있다. 그러나 그림에서 볼 수 있듯이 무차원 평균 월파량 산정을 위해 EurOtop(2018)이나 CEM(2006)에서 제안된 식(1)은 월파량이 아주 큰 경우를 제외하고는 약간의 차이를 보인 반면, 전달계수를 산정하기 위해 사용한 식(4)와 식(5)는 차이가 크다. 식(5)가 월파에 따른 전달계수를 너무 과소추정하고 있다. 따라서 보수적으로 혼성제의 마루높이를 산정할 경우는 EurOtop(2018)의 식(1)과 식(4)를 적용하는게 바람직하다.

본 연구에서는 방파제 형식에 따른 무차원 평균 월파량과 전달계수의 관계도 비교하였다. 소파블록 피복제의 경우는 EurOtop(2018)의 식(1)과 식(6)을 사용하여 계산하였다. 비교 결과를 Fig. 6에 제시하였는데, 동일한 허용 월파량에 대하여

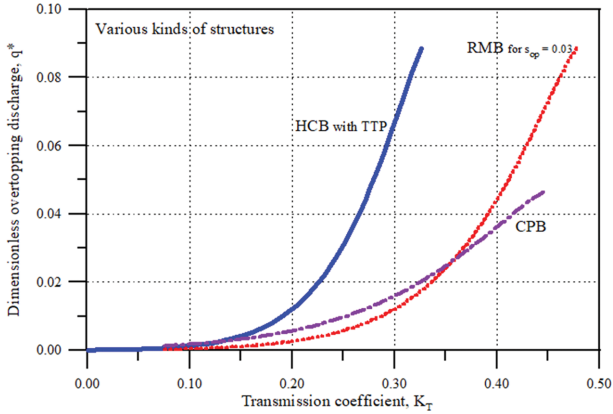


Fig. 6. Wave transmission coefficients and dimensionless overtopping discharges according to types of breakwaters.

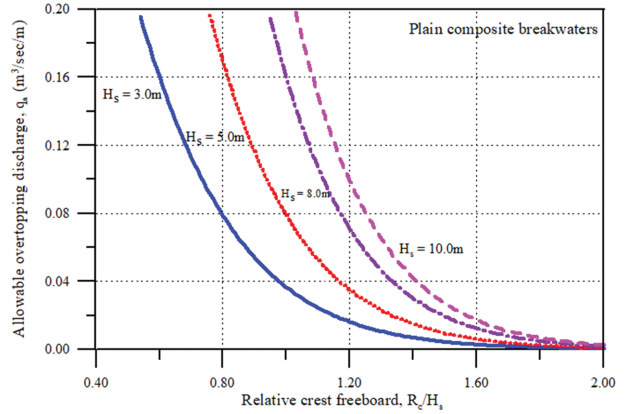


Fig. 8. Relative crest freeboards and allowable overtopping discharges with various wave heights for plain composite breakwaters.

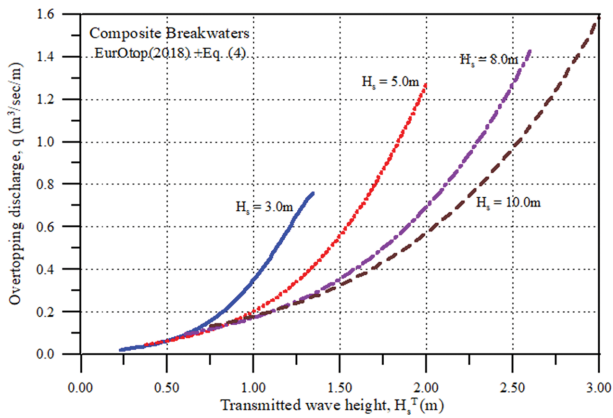


Fig. 7. Transmitted wave heights and overtopping discharges with various wave heights for plain composite breakwaters.

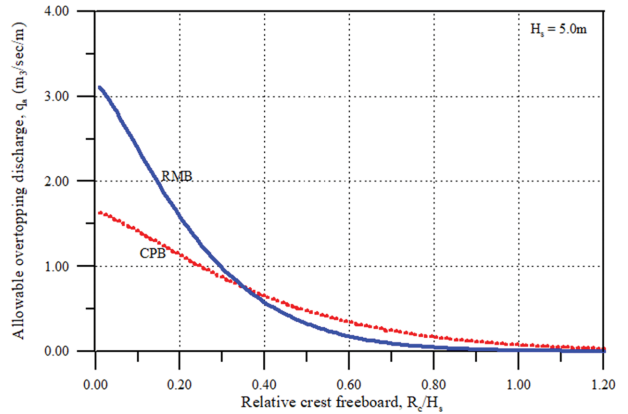


Fig. 9. Comparison of relative crest freeboards versus allowable overtopping discharges of plain composite breakwaters and rubble-mound breakwaters.

전달계수는 소파블록 피복제(HCB: Horizontally-Composite Breakwaters)가 가장 작다. 그러나 혼성제(CPB: Composite Breakwaters)와 경사제(RMB: Rubble-Mound Breakwaters)의 경우는 무차원 허용 월파량 0.025를 기준으로 달라진다. 즉, 무차원 허용 월파량이 0.025보다 작은 구간에서는 혼성제의 전달계수가 경사제의 전달계수보다 작다. 이는 경사제에서는 투과파의 영향을 고려해야 하기 때문이다. 그러나 무차원 허용 월파량 0.025보다 큰 구간에서는 반대로 경사제의 전달계수가 작아진다. 이는 월파량인 커지면 경사면을 따라 전달되는 경사제와는 다르게 혼성제에서는 월파가 항내로 직접 낙하하여 상대적으로 큰 항내 전달파고를 유발하기 때문이다. 또한 소파블록 피복제의 경우는 혼성제 전면에 경사식 피복 블록을 설치하여 월파를 소산시킬 뿐만 아니라 경사제에 비하여 천단폭도 크고 투과파도 차단하기 때문에 상대적으로 경사제나 일반 무공 케이슨식 혼성제 보다는 전달파고가 작아진다는 물리적 특성을 잘 반영한다.

마지막으로 경사제에 적용한 방법으로 식(9)를 이용하여 무공 케이슨 혼성제에서 허용 월파량에 따른 상대 마루높이를 결정하였다. 먼저 입사파고에 따른 허용 월파량을 산정할 수 있는 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 보수적인 관점에서 EurOtop

(2018)의 식(1)과 식(4)를 이용하여 입사파고를 변화시켜 산정한 결과이다.

또한 식(9)에 의하여 산정된 혼성제의 허용 월파량에 따른 상대 마루높이를 Fig. 8에 제시하였다. 전반적인 거동 특성이 경사제와 유사하다. 그러나 동일한 허용 월파량에 대하여는 방파제 형식에 따라 비교하면 혼성제의 마루높이가 경사제의 마루높이보다 상대적으로 크게 산정된다. 이를 더 확인하기 위하여 Fig. 9에 입사파고, 5.0 m에 대한 결과를 방파제 형식별로 비교하였다. 허용 월파량이 아주 큰 경우를 제외하고는 혼성제의 마루높이가 경사제의 마루높이보다 크게 산정된다. 이는 평균 월파량 산정식에 포함된 특성 때문이다. 상대 마루높이 0.32를 기준으로 방파제의 형식에 따라 평균 월파량이 다르게 산정되기 때문이다.

5. 결 론

최근 우리나라에 직접적인 영향을 미치는 태풍은 과거와 다르게 매년 2개에서 3개 이상 발생하고 있다. 그로 인해 항만 운용 등에 미치는 월파의 영향이 크게 자주 발생하고 있다.

따라서 입사파량과 월파에 의해 발생하는 항내 전달과고의 관계가 주요 항만의 방파제 설계에 올바르게 고려되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 방파제를 여러 형식으로 분류하여 입사과고와 평균 월파량, 그리고 전달과고의 관계를 해석하였다. 즉, 경사제, 혼성제 그리고 소파블록 피복제를 대상으로 평균 월파량과 전달과고의 관계를 해석하였다. 따라서 본 연구에서 제시된 해석법을 이용하면 전달과고와 허용 월파량을 동시에 고려하여 방파제의 마루높이를 결정할 수 있다.

먼저 EurOtop(2018)과 동일한 경사제 조건에서 평균 월파량과 전달과고의 관계를 해석하였다. 평균 월파량이 같아도 파형경사가 작아지면 전달과고는 커지고, 월파량이 거의 없는 경우에도 방파제 배후면 인근에서 어느 정도 전달과고가 발생하는 등 제반 특성들이 매우 만족스럽게 검증되었다. 특히 본 연구에서는 임의의 입사파량에 대하여도 적용할 수 있는 무차원 평균 월파량과 전달계수의 관계도 방파제 형식별로 제시, 비교하였다. 또한 주기 및 파고 변화에 따른 평균 월파량과 전달과고의 관계를 해석하였다. 이로부터 얻어진 허용 월파량을 근거로 태풍시 방파제의 마루높이를 쉽게 결정할 수 있는 방법을 제시하였다. 즉, 허용 월파량에 따른 상대 마루높이 결정방법을 방파제 형식에 따라 제시하였다. 경사제와 무공 케이슨식 혼성제에 대하여 입사과고를 변화시키면서 적용하였는데, 경사제와 혼성제 모두에서 허용 월파량이 커지면 상대 마루높이는 급격하게 작아지는 경향을 보였다. 특히 상대적으로 작은 범위에서는 허용 월파량이 동일해도 혼성제의 마루높이가 경사제의 마루높이보다 커야 하지만, 일정 수준 이상의 큰 허용 월파량에 대해서는 그 반대의 경향을 보였다. 혼성제의 경우는 월파량이 작아도 항내로 직접 낙하하여 상대적으로 큰 항내 전달과고를 유발하지만, 월파량이 일정 수준을 넘어서면 방파제의 형식에 따른 영향이 작아지면서 체제를 통한 투과파의 영향이 경사제에 고려되기 때문이다.

비록 최근까지 경사제에 대한 전달계수 산정식에 대하여는 많은 연구가 수행되었지만, 상대적으로 다른 여러 형식의 방파제에 대한 연구는 미진한 실정이다. 따라서 수리모형 실험이나 현장관측 자료를 이용하여 방파제 형식별로 정도 높은 전달계수 산정식을 개발하기 위한 추가적인 노력이 필요하다. 또한 월파량 산정과 관련하여도 경험식에 내포된 불확실성에 대한 확률론적 해석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 해양수산과학기술진흥원의 지원(과제번호 20180323)으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

References

Ahrens, J.P. (1987). Characteristics of Reef Breakwaters. Technical Report CERC-87-17, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

- Alberti, P., Bruce, T. and Franco, L. (2001). Wave transmission behind vertical walls due to overtopping. Breakwaters, Coastal Structures and Coastline. Proc. Int. Conf. in 2001, London.
- CEM (2006). Coastal Engineering Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Washington D.C., USA.
- Daemen, I.F. (1991). Wave Transmission at Low-Crested Breakwaters. M.S. thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- EurOtop (2007). European manual for the assessment of wave overtopping. Die Kuste, 73, Hamburg.
- EurOtop (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. 2nd. Edition, London.
- Goda, Y. (2000). Random seas and design of maritime structures. 2nd. Edition, World Scientific Publishing Co.
- Goda, Y. (2010). Random seas and design of maritime structures. 3rd. Edition, World Scientific Publishing Co.
- Lee, C.-E. (2003). Reliability analysis of sloped coastal structures against random wave overtopping. J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 15(4), 214-223 (in Korean).
- Lee, C.-E. (2009). Reliability analysis and evaluation of partial safety factors for random wave overtopping. KSCE J. of Civil Engrg., 13(1), 7-14.
- Lee, C.-E. (2011). Reliability analysis of maximum overtopping volume for evaluating freeboard of vertical breakwaters. J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(2), 154-162 (in Korean).
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries) (2020). Technical design standards and commentaries for ports and harbors in Korea (in Korean).
- Powell, K.A. and Allsop, N.W. (1985). Low-crest breakwaters, hydraulic performance and stability. Report No. SR 57, Hydraulic Research Station, Wallingford, England.
- Rock Manual (2007). The use of rock in hydraulic engineering. 2nd. Edition, CIRIA; CUR; CETMEF, C683, CIRIA, London.
- Seelig, W.N. (1980). Two-dimensional tests of wave transmission and reflection characteristics of laboratory breakwaters. Tech. Report No. 80-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS., USA.
- Tanimoto, K., Takahashi, S. and Kimura, K. (1987). Structures and Hydraulic Characteristics of Breakwaters - The State of the Art of Breakwater Design in Japan. Report of the Port and Harbour Research Institute, Japan, 26(5), 11-15.
- van der Meer, J.W. (1988). Rock Slopes and Gravel Beaches Under Wave Attack. Ph.D. diss., Delft University of Technology, The Netherlands (Also Delft Hydraulics Publication No. 396).
- Viet, N.D., Verhagen, H.J., van Gelder, P.H.A.J.M. and Vrijling, J.K. (2008). Conceptual design for the breakwater system of the south of Doson naval base: Optimization versus deterministic design, COPEDEC VII, Paper No. 053, Dubai, UAE.

Received 16 March, 2021

Revised 9 April, 2021

Accepted 15 April, 2021